干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

黄土高原地区极端气候指数时空变化

杨维涛[1,2,3]， 孙建国[1,2,3]， 康永泰[4]， 马恒利[1,2,3]， 徐睿择[1,2,3]

（1 兰州交通大学测绘与地理信息学院，甘肃 兰州 730070； 2 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心，甘肃 兰州 730070； 3 甘肃省地理国情监测工程实验室，甘肃 兰州 730070； 4 兰州市勘察测绘研究院，甘肃 兰州 730030）

摘 要：黄土高原生态环境脆弱，极端气候频发，越来越多的影响到人类的生产生活。通过基于138个气象站点观测资料，利用一元线性方程和Mann-Kendall法分析了黄土高原地区27个极端气候指数的时空变化，得到以下主要结论：(1) 极端气温指数中霜冻日数、冰冻日数、日最低气温的极高值和冷持续日数在逐渐减少，生长季长度、夏季日数，热夜日数、日最高气温的极高值、暖持续日数在逐渐增加。(2) 极端气温指数中冷昼日数、冷夜日数、日最低气温极低值、日最高气温极高值、气温日较差在子区域与全区变化趋势存在不同，主要表现在黄土塬区、黄土峁状丘陵区和石质山地区。(3) 极端降水指数变化趋势平缓，与多年均值接近。在空间分布上，除极强降水量、强降水量和年均雨日降水强度在各子区域上与全区变化趋势一致外，其余指数在各子区域上与全区变化趋势存在不同，主要表现在黄土塬和黄土梁状丘陵区。(4) 多数极端气温指数的突变主要发生在1980—1985年和2010—2015年；多数极端降水指数的突变主要发生在1985—1990年和2010—2015年。

关 键 词：黄土高原；极端气候；时空特征；突变
文章编号：

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC)第五次报告指出全球气温在过去的130 a里增加了0.85 ℃[1-2]。IPCC 2018年发布报告呼吁各国将全球气温升高的幅度控制在比工业化前高1.5 ℃范围以内。美国国家航空航天局(NASA)发布的全球气候报告也指出，2018年是自1880年有全球平均气温记录以来第四暖的年份。越来越多研究表明全球气候正在变暖。随着全球气候的变暖，极端气候事件发生频率逐渐加快，影响范围更加广泛，这对世界各国的经济发展和人类生活造成了很大的不利影响[3]。

极端气温和极端降水事件已经引起越来越多专家学者们的密切关注。极端气温事件研究表明，自1950年后，全球暖夜数显著增加，霜冻、冰冻天数减少，温度日较差显著下降，地区变化速率差异性显著[3-4]。极端降水方面，各地区之间极端降水变化特征有明显的差异，同时，极端降水事件使得年降水量普遍呈现上升趋势[5]，但在内蒙古极端气候研究表明，降水均呈不同程度的下降趋势[6]。同样在欧洲、美洲等地区性[7-9]的极端气候研究中，极端气温事件与极端降水事件变化趋势显著。在我国整个区域极端气候事件研究中，极端暖指数明显上升，冷指数明显下降[10-11]。我国青藏高原极端气候研究表明，西部地区冷指数呈显著下降趋势，暖指数呈明显上升趋势，昼夜温差范围降低，生长季长度明显增加[12]。内蒙古地区极端气候事件研究结果表明极端高温事件明显增加，极端低温明显下降[13-15]，而内蒙古草原区气温同样显著升高[16]。甘肃省河东区极端气温研究结果表明极端气温极值指数、作物生长期均呈上升趋势[17]。柴达木盆地极端气温总

收稿日期：2019－09－11； **修订日期：**2020－06－11
基金项目：国家自然科学基金项目(41361080)；兰州交通大学优秀平台支持项目(201806)
作者简介：杨维涛(1994-)，男，陕西宝鸡人，硕士研究生，研究方向为资源与环境遥感. E-mail: 913117597@qq.com
通讯作者：孙建国，男，教授. E-mail: sunjianguo@mail.lzjtu.cn

的呈现上升趋势，且最低气温的周期缩短[18]。总的来看，国内外学者对大区域极端气候研究较为丰富，尤其是干旱半干旱区域，这为复杂气候条件下的黄土高原极端气候研究提供了指导。

黄土高原地区（Loess Plateau Region, LPR）的生态环境是我国生态环境重要组成部分，气候条件复杂多变，加之近年来人类活动加剧，导致极端气候频发，从而迫切需要研究LPR在极端气候条件下的发展。虽然有学者对黄土高原极端气候指数[19-20]有研究，但是研究的极端气候指数均不够全面，此外在研究中利用的气象站点数较少。本文基于138个气象站点分析了LPR 27个极端气候指数的时空变化，不仅有助于促进LPR生态环境保护和水土治理成果的维持，而且能够强有力的为黄土高原区域可持续发展提供决策支持。

1　研究区概况

黄土高原是中国大陆中心地带，位于33°41′~41°16′N，100°52′~114°33′E之间，自然条件复杂多样。黄土高原最西在乌鞘岭、日月山，至青藏高原一带，北到达謡山、熊耳山一带，东边与太行山、华北平原相邻，南到华山边界的秦岭（图1）。主要包括陕西省，山西省，甘肃省，青海省，河南省，宁夏回族自治区，内蒙古自治区等省、自治区，总面积约6.4×10^5 km²，是世界上最大的黄土聚集区，生态环境脆弱，极端气候频发。

2　数据与方法

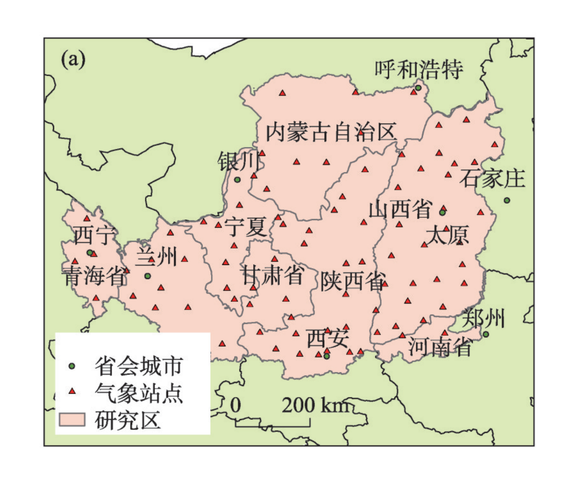
2.1　气象数据的处理

（1）气象数据获取与预处理

在中国气象数据网（http://data.cma.cn/）获取研究区气象资料。在研究区138个地面气象站点中，选取1980—2016年的日气象数据进行预处理，包括逐日降水量、逐日最低（最高）气温以及逐日平均气温等气象资料。根据LPR地理分区图对所选取的138个地面气象站点进行分区[21]，如表1所示。由于盖沙黄土丘陵区和土石丘陵区无气象站点，因此将二者与其他区域合并研究。

（2）极端气候指数数据集的构建

本文使用RClim Dex模型计算极端气候指数。利用该模型计算27个极端气候指数（世界气象组织气候委员会推荐使用的核心极端气候指数，定义及分类如表2所示。包括16个极端温度指数和11个极端降水指数），计算黄土高原及其8大类分区各气象站点极端气候指数的时间序列值，形成黄土高原地区1981—2015年极端气候数据集。



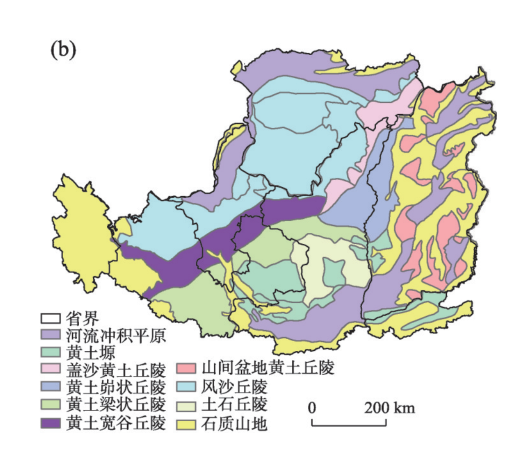


图1　黄土高原地理位置、气象站点及分区示意图

Fig. 1　Geographical location, meteorological sites and divisions of the Loess Plateau

表1　黄土高原各子区间名称

Tab. 1　Names of sub-interval in the Loess Platea

代码	I区	II区	III区	IV区	V区	VI区	VII区	VII区
子区间名称	河流冲积平原	黄土塬	黄土峁状丘陵	黄土梁状丘陵	黄土宽谷丘陵	山间盆地丘陵	风沙丘陵	石质山地

2.2 趋势分析

趋势分析是指气候要素在长时间序列下呈现出来的持续增加或者减少的变化分析[3]。研究中LPR极端气候的变化趋势用一次线性方程来表示,即:

$$Z = ax + b \tag{1}$$

式中:Z指极端气候要素;x指时间;a指线性趋势变化。a具体指在研究区时间序列中极端气候要素的变化,即年际倾向率。当a>0时,a越大,上升趋势越明显;反之,当a<0时,a越小,下降趋势越明显。

2.3 突变分析

本文采用Mann-Kendall法[22-23]对LPR极端气候指数进行突变检验。Mann-Kendall突变检验的计算原理如下所示:

假设时间序列为$X_1, X_2, \cdots, X_n$,S_k表示第i个样本$X_i > X_j$ ($1 \leqslant i \leqslant j$)的累计数,定义统计量:

$$S_k = \sum_i^k r_i,\ r_i = \begin{cases} 1, X_i > X_j \\ 0, X_i < X_j \end{cases}, \quad (j = 1, 2, \cdots n, i;\ k = 1, 2, \cdots, n) \tag{2}$$

假设在时间序列随机独立的情况下,S_k的均值和方差分别为:

$$\bar{X}[S_k] = X(X-1)/4 \tag{3}$$

$$\sigma^2[S_k] = X(X-1)(2X+5)/72 \quad (1 \leqslant k \leqslant n) \tag{4}$$

将S_k标准化为:

$$UF = (S_k - \bar{X}[S_k]) / \sqrt{\sigma^2[S_k]} \tag{5}$$

表2 极端气候指数定义与分类

Tab. 2 Definition and classification of extreme climate indices

类别	分类	指数名称	定义	指数代码	单位
极端降水指数	降水量指数	单日最大降水量	每月最大1 d降水量	*RX1day*	mm
		连续5 d最大降水量	连续5 d最大降水量	*RX5day*	mm
		强降水量	单日降雨量大于第95%的降水量和	*R95p*	mm
		极强降水量	单日降雨量大于第99%的降水量和	*R99p*	mm
		年均雨日降水强度	单日降雨量≥1 mm的总量与总天数之比	*SDII*	mm·d^{-1}
		雨日降水总量	雨日(日降水量≥1 mm)降水总量	*PRCPTOT*	mm
	降水日指数	持续干燥日数	日降水量<1 mm的最长连续天数	*CDD*	d
		持续湿润日数	日降水量≥1 mm的最长连续天数	*CWD*	d
		中雨日数	每年日降水量(PRCP)≥10 mm的总天数	*R*10	d
		大雨日数	每年日降水量(PRCP)≥20 mm的总天数	*R*20	d
		暴雨日数	每年日降水量(PRCP)≥25 mm的总天数	*R*25	d
极端气温指数	相对指数	冷昼日数	日最高气温<10%分位值的天数	*TX*10*P*	d
		冷夜日数	日最低气温<10%分位值的天数	*TN*10*P*	d
		暖昼日数	日最高气温>90%分位值的天数	*TX*90*P*	d
		暖夜日数	日最低气温>90%分位值的天数	*TN*90*P*	d
	绝对指数	霜冻日数	年内日最低气温<0 ℃的天数	*FD*0	d
		冰冻日数	年内日最高气温<0 ℃的天数	*ID*0	d
		夏季日数	年内日最高气温>25 ℃的天数	*SU*25	d
		热夜日数	年内日最低气温>20 ℃的天数	*TR*20	d
	极值指数	日最高气温的极高值	单月内日最高气温的最大值	*TXx*	℃
		日最低气温的极高值	单月内日最低气温的最大值	*TNx*	℃
		日最高气温的极低值	单月内日最高气温的最小值	*TXn*	℃
		日最低气温的极低值	单月内日最低气温的最小值	*TNn*	℃
	其他指数	暖持续日数	日最高气温>90%分位值的连续6 d的天数	*WSDI*	d
		冷持续日数	日最低气温<10%分位值的连续6 d的天数	*CSDI*	d
		生长季长度	平均气温首先出现至少连续6 d>5 ℃,以及首先出现在7月1日后至少连续6 d>5 ℃的总天数	*GSL*	d
		气温日较差	年内日最高气温与最低气温的差值	*DTR*	℃

式中：X为时间序列中间数值$i<j$时$X_i<X_j$出现的次数；i、j为年份；X_i、X_j分别为i、j年的数据。

3 结果与讨论

3.1 极端气温变化特征

3.1.1 极端气温指数时间变化特征 如图2所示，*TX90P*、*TN90P*年际倾向率均为正，呈上升趋势，*TX90P*的增长速度比*TN90P*的增长速度更快。*TX10P*、*TN10P*年际倾向率均为负，但下降速度均较小，趋势相对稳定。*FD0*和*ID0*呈明显下降趋势。*FD0*、*ID0*年际倾向率为-0.6 d·a^{-1}、-0.214 d·a^{-1}，*FD0*的下降幅度相对较大。*SU25*和*TR20*年际倾向率分别为0.467 d·a^{-1}和0.288 d·a^{-1}，上升幅度较大。

如图3，*TNx*年际倾向率为-0.018 ℃·a^{-1}，下降趋势缓慢。*TXn*、*TXx*和*TNn*年际倾向率分别为0.007 ℃·a^{-1}、0.048 ℃·a^{-1}和0.018 ℃·a^{-1}，其中*TNx*上升趋势最快，*TXn*最慢。总体上，极端气温极值指数的变化趋势相对较小，变化不明显。*GSL*和*WSDI*呈现明显上升趋势。*GSL*的年际倾向率为0.582 d·a^{-1}，*WSDI*的年际倾向率为0.119 d·a^{-1}，*GSL*上升幅度大于*WSDI*的上升幅度。*CSDI*和*DTR*的年际倾向率分别为-0.067 ℃·a^{-1}和-0.011 ℃·a^{-1}，均呈下降趋势。

3.1.2 极端气温指数空间变化特征 如表3所示，各子区域与全区*TN90P*和*TX90P*变化趋势一致，均呈上升趋势。在各子区间中，黄土塬区、黄土梁状丘陵区、黄土宽谷丘陵区、风沙丘陵区、石质山地区*TX90P*变化幅度较大。黄土塬区、风沙丘陵区和石质山地*TN90P*变化趋势明显。各子区域中，在石质山地区*TX10P*呈下降趋势，其余子区域均呈上升趋势；在黄土塬区、黄土梁状丘陵区*TN10P*呈上升趋势，其余子区间呈下降趋势。在黄土梁状丘陵区、黄土宽谷丘陵区、山间盆地丘陵区及风沙丘陵区*TX10P*呈缓慢上升趋势。

各子区间中，在黄土塬区、河流冲积平原、黄土峁状丘陵区、黄土梁状丘陵区、黄土宽谷丘陵区*ID0*下降趋势明显，在黄土塬区、黄土梁状丘陵区、黄土宽谷丘陵、风沙丘陵区*FD0*年际变化趋势均较大，下降趋势明显。*SU25*在各子区域上升趋势明显。*TR20*除石质山地的变化较为平缓，其余子区间上升趋势明显。

*TXx*在各子区间呈上升趋势，与整个黄土高原全区变化趋势一致，且冲积平原区和黄土峁状区上升趋势明显。除黄土塬区，*TNx*呈明显上升趋势，其余各子区域均呈下降趋势，与全区变化趋势一致。在各子区域中，*TXn*除黄土宽谷丘陵和石质山地呈下降趋势，其余各子区域呈增长趋势，同时黄土宽谷丘陵区和山间盆地丘陵区上升缓慢。*TNn*在各子区间有增有减。

*WSDI*和*GSL*各子区间与全区变化趋势一致，呈上升趋势。黄土宽谷丘陵区、山间盆地丘陵区以及石质山地区*WSDI*上升缓慢，其余子区域呈明显上升趋势。河流冲积平原、黄土宽谷丘陵区及山间盆地丘陵区*CSDI*呈下降趋势。各个子区间的*GSL*年际倾向率变化幅度均较大，上升趋势明显。各个子区域中，*DTR*在黄土塬区、黄土梁状丘陵区及石质山地呈上升趋势。

总的来看，*LPR*极端气温指数在空间上存在差异。除与全区变化一致的指数外，*TX10P*、*TN10P*、*TNx*、*TXn*、*DRT*在各子区间上与全区变化趋势存在差异，主要表现在黄土塬区、黄土峁状丘陵区和石质山地区。

3.1.3 极端气温指数突变分析 如图4的M-K突变结果所示，*TX90P*在1989—1993年、1995—2000年发生突变。*TN90P*突变发生在1980—1985年、1995—2000年、2000—2005年。*TX10P*在1982—1987年、2008—2013年发生突变。*TN10P*突变发生在1980—1988年和2008—2016年。

由于篇幅所限，其余突变检验不再列出。*FD0*在1995—2000年突变下降。*ID0*在1985—1990年、1990—1995年发生突变。*SU25*在1990—1995年突变上升。*TR20*在1990—1995年发生3次突变。*TXx*在1980—1985年、2000—2005年、2010—2015年发生突变。*TNx*在1980—1985年、2000—2005年、2010—2015年发生突变。*TXn*在2005—2015突变3次。*TNn*在1980—1985年、2005—2010年、2010—2015年发生突变。*WSDI*在1980—1985年突变上升。CSDI在1980—1985年突变下降。*GSL*在1995—2000年突变上升。*DTR*在1980—1985年、1985—1990年、1990—2000年发生突变。总的来看，黄土高原极端气温指数突变多发生在1980—1985年和2010—2015年这两个时间段。

3.2 极端降水事件变化特征

3.2.1 极端降水事件时间变化特征 图5中，*RX1day*和*RX5day*呈下降趋势，*SDII*、*R95p*、*R99p*、*PRCPTOT*

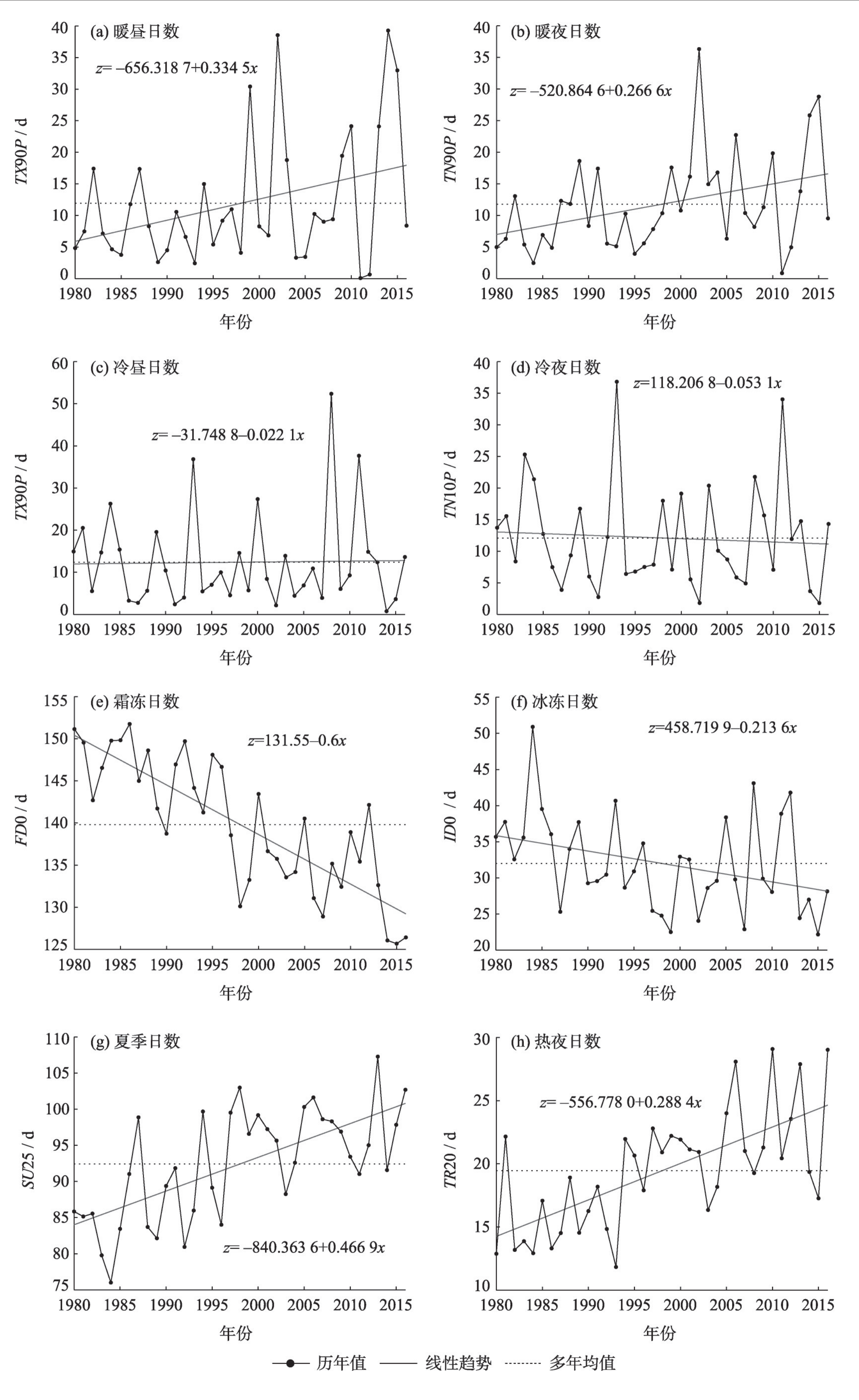


图2 极端气温相对指数和绝对指数变化趋势

Fig. 2 Trends of extreme temperature relative index and absolute index

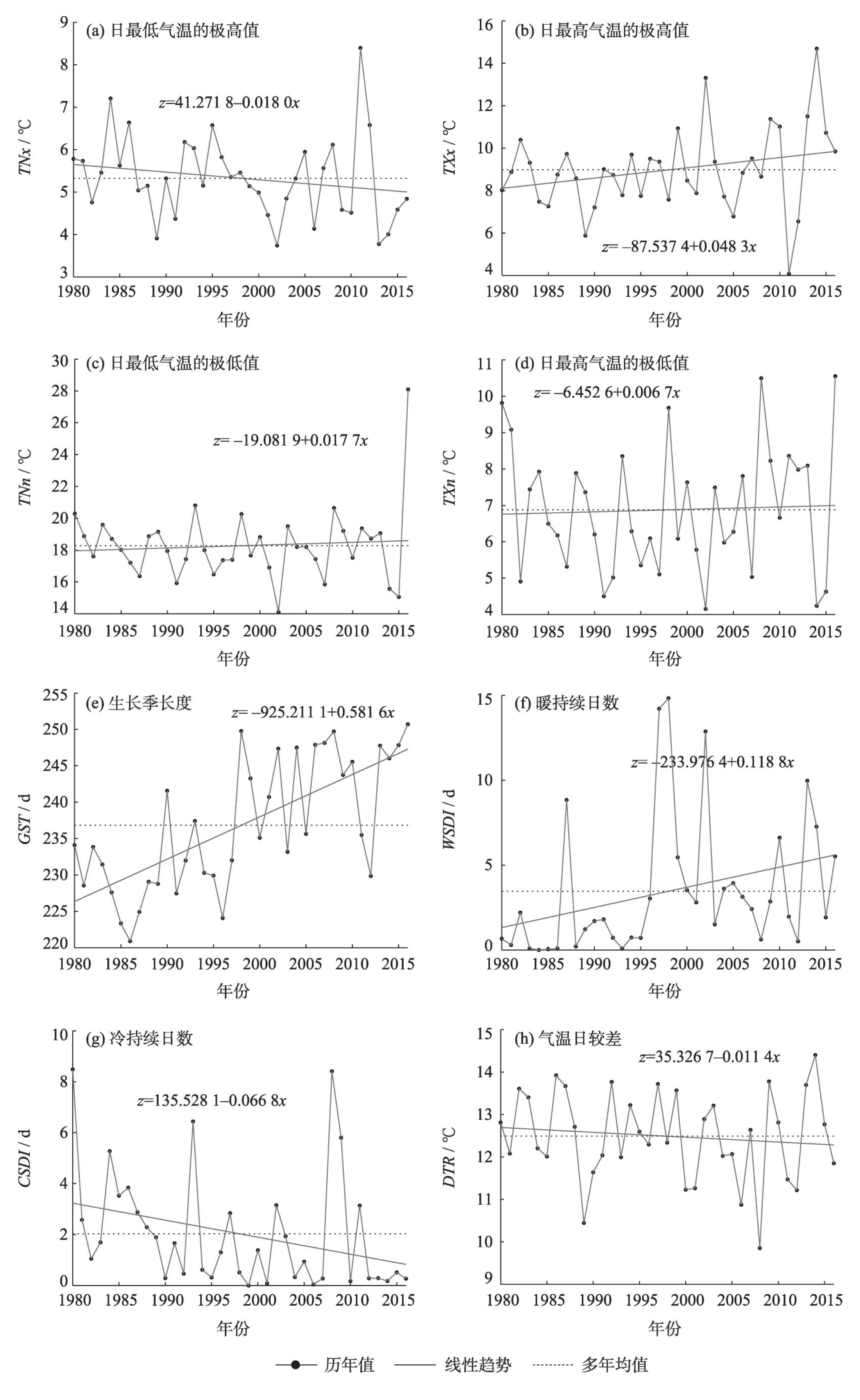


图3　极端气温极值指数和其他指数变化趋势

Fig. 3　Trends of extreme temperature extreme index and other index

表3 各子区域极端气温指数与全区年际倾向率

Tab. 3 Extreme temperature index of each sub-area and the annual inter-annual tendency rate of the whole region

	I区	II区	III区	IV区	V区	VI区	VII区	VII区	全区
TX90P	0.351 4	0.374 8	0.413 8	0.336 4	0.316 6	0.364 0	0.395 0	0.357 9	0.334 0
TN90P	0.269 9	0.197 2	0.206 3	0.298 2	0.342 0	0.230 9	0.375 2	0.157 9	0.267 0
TX10P	0.066 2	0.057 6	0.170 2	0.010 1	0.040 0	0.071 7	0.031 7	−0.092 1	−0.022 0
TN10P	−0.008 5	0.179 6	0.114 5	−0.073 9	−0.281 7	−0.228 2	−0.072 8	−0.026 8	−0.053 0
FD0	−0.000 6	−0.500 0	−0.397 4	−0.482 7	−0.376 0	−0.498 1	−0.358 5	−0.016 2	−0.600 0
ID0	−0.183 7	−0.237 2	−0.244 1	−0.188 2	−0.162 8	−0.088 0	−0.251 2	−0.279 5	−0.213 0
SU25	0.500 9	0.452 9	0.365 5	0.600 0	0.468 6	0.411 8	0.535 9	0.572 5	0.467 0
TR20	0.413 8	0.179 0	0.236 7	0.234 9	0.214 6	0.500 7	0.247 0	0.086 6	0.288 0
TXx	0.047 7	0.055 9	0.063 7	0.055 4	0.041 5	0.016 4	0.073 3	0.049 4	0.048 0
TNx	−0.014 4	0.197 2	−0.040 1	−0.065 0	−0.026 2	−0.010 9	−0.053 7	−0.010 4	−0.018 0
TXn	0.015 6	0.010 4	0.030 3	0.003 1	−0.006 5	0.039 6	0.012 7	−0.015 4	0.007 0
TNn	0.029 3	0.106 2	0.014 6	0.093 8	0.043 6	−0.035 4	−0.017 3	0.056 6	0.018 0
WSDI	0.113 7	0.136 9	0.096 9	0.127 2	0.138 5	0.078 7	0.146 1	0.164 8	0.119 0
CSDI	−0.076 1	−0.016 2	−0.031 2	−0.019 9	−0.118 7	−0.140 4	−0.061 0	−0.025 6	−0.067 0
GSL	0.581 0	0.610 0	0.531 9	0.453 0	0.360 0	0.588 5	0.529 4	0.492 4	0.582 0
DTR	−0.013 7	0.016 9	0.005 0	−0.029 9	−0.032 1	−0.032 9	−0.016 2	0.009 4	−0.011 0

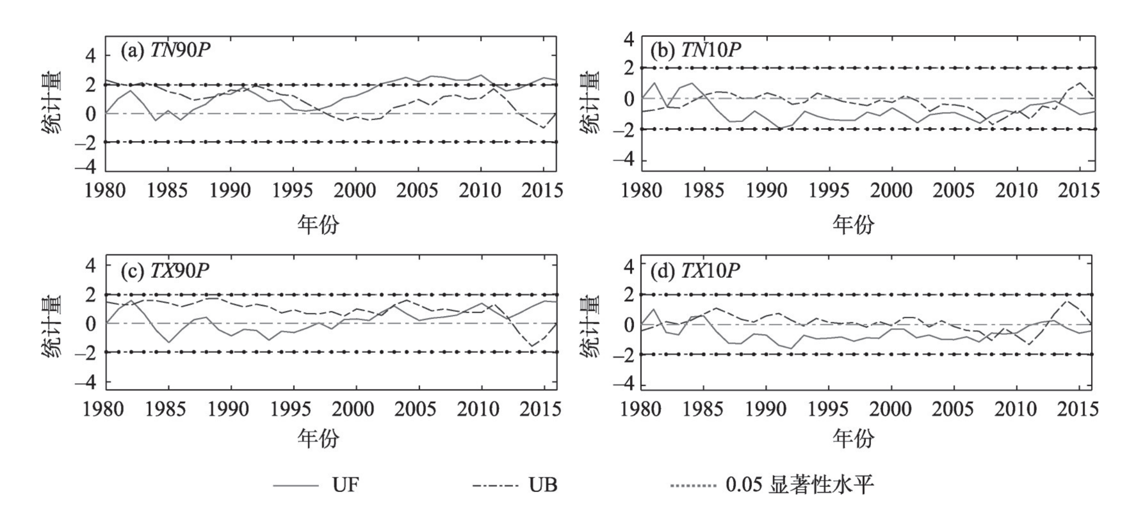


图4 极端气温极值指数M-K突变检验

Fig. 4 M-K mutation test of extreme temperature extreme value index

均呈上升趋势,但上升趋势都不明显。*R*10、*R*20、*R*25、*CDD* 以及 *CWD* 年际倾向率依次分别是0.089 mm·a^{-1}、0.002 mm·a^{-1}、0.000 2 mm·a^{-1}、−0.097 3 d·a^{-1}和−0.032 d·a^{-1}。*CDD*、*CWD* 呈下降趋势。*R*10、*R*20以及 *R*25 均呈上升趋势,但上升趋势不是很明显。总体上极端降水指数变化不是很明显,均接近均值。

3.2.2 极端降水指数的空间变化特征 LPR子区域极端降雨指数与全区年际倾向率及变化趋势如表4所示。在河流冲积平原、黄土峁状丘陵、黄土宽谷丘陵以及石质山地 *RX1day* 呈下降趋势,其余子区域呈上升趋势。*RX5day* 在河流冲积平原和黄土峁状丘陵区呈下降趋势,其余子区域年际倾向率均大于0,呈上升趋势。*R95p* 与 *R99p* 在各子区域呈上升趋势。*SDII* 在各子区域年际倾向率均呈正值,与全区趋势一致。*PRCPTOT* 除黄土塬区呈下降趋势,其余子区域呈上升趋势。

在河流冲积平原 *CDD* 呈上升趋势,其余子区域呈下降趋势。在河流冲积平原、黄土塬区以及山间盆地丘陵区 *CWD* 呈下降趋势。在黄土塬区和黄土梁状丘陵 *R*10 呈下降趋势,下降趋势并不明显,其余子区域呈上升趋势。在各子区域 *R*20 均呈上升趋势。只

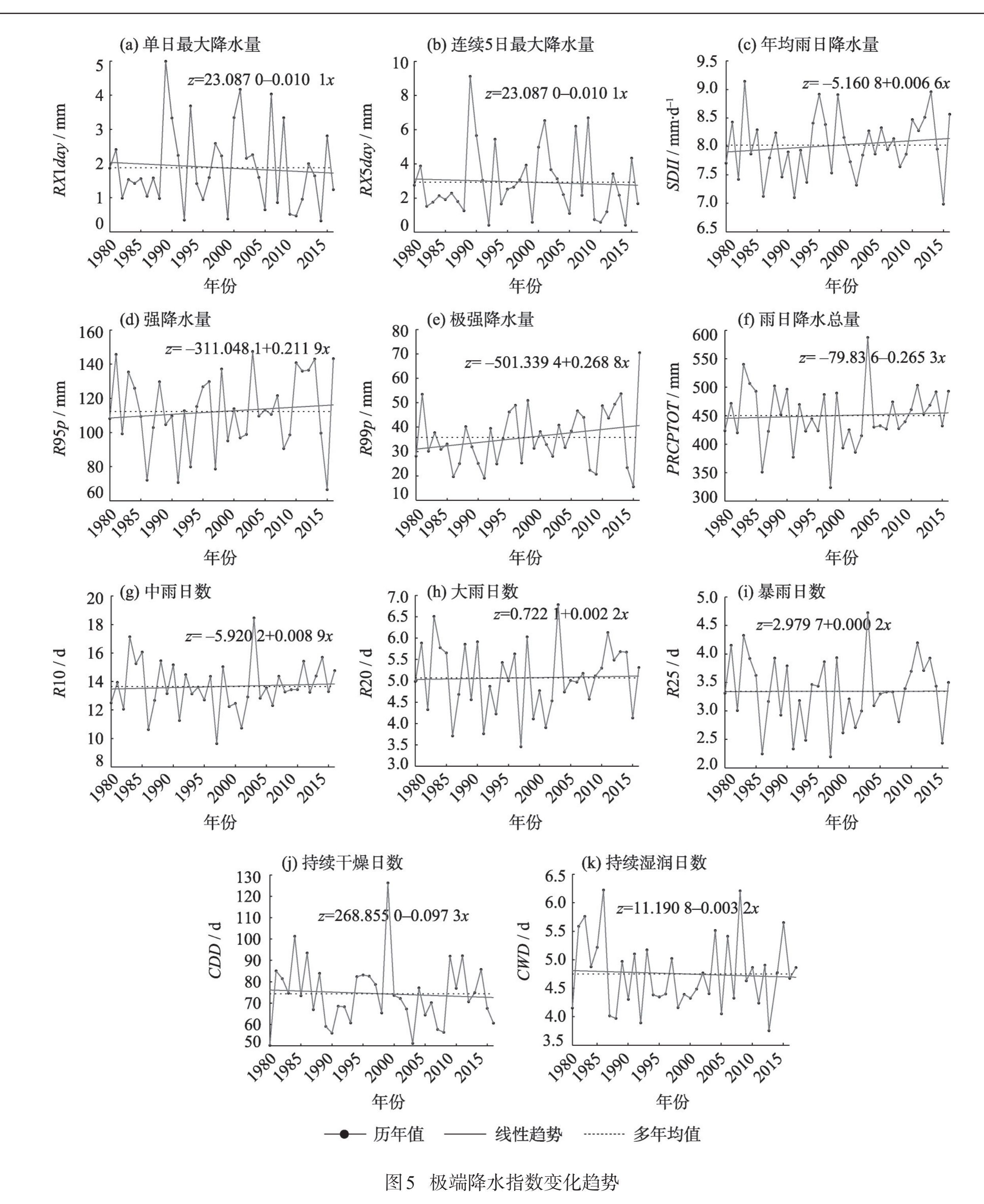


图5 极端降水指数变化趋势

Fig. 5 Trends of extreme precipitation index

有在黄土塬区*R*25呈下降趋势，其余均呈上升趋势。

总体上看，LPR极端降水指数在空间分布上差异明显。除*R*99*p*、*R*95*p*和*SDII*在各子区域上与全区一致外，其余极端降水指数在各子区域上与全区差异明显，主要表现在黄土塬区和黄土梁状丘陵区。

3.2.3 极端降水指数突变分析 极端降水指数M-K突变结果表明，*RX*1*day*、*RX*5*day*均在1995—2000年、1985—1990年、2005—2015年发生突变。*R*99*p*在1995—2000年、2005—2010年、2010—1016年发生突变。*R*95*p*在1980—1985年、2005—2010年、2010—1016年发生突变。*SDII*在1980—1985年、2008—2015年发生突变。*PRCPTOT*在1980—1985年、2010—2015年发生突变。

CDD 在 1980—1985、1993—2000 年 、2010—

表4　黄土高原各子区域极端降水指数与全区年际倾向率

Tab. 4　Extreme precipitation index and annual inter-annual tendency rate of various regions in the Loess Plateau

	I区	II区	III区	IV区	V区	VI区	VII区	VII区	全区
RX1day	-0.007	0.008	-0.006	0.002	-0.004	0.005	0.004	-0.002	-0.009
RX5day	-0.002	0.015	0.008	0.020	-0.009	0.015	0.008	0.003	-0.010
R95p	0.238	0.008	0.334	0.001	0.455	0.683	0.351	0.494	0.007
R99p	0.380	0.364	0.060	0.110	0.351	0.531	0.189	0.254	0.212
SDII	0.008	0.005	0.013	0.016	0.014	0.011	0.005	0.010	0.269
PRCPTOT	0.175	-0.174	0.001	0.420	0.284	0.001	0.001	0.581	0.265
CDD	0.070	-0.139	-0.057	-0.285	0.041	-0.275	-0.147	-0.256	-0.098
CWD	-0.007	-0.005	0.012	0.019	0.001	-0.018	-0.011	0.001	-0.032
R10	0.003	-0.005	0.047	-0.005	0.067	0.006	0.037	0.014	0.089
R20	0.003	-0.019	0.019	0.006	0.016	0.011	0.013	0.009	0.002
R25	0.002	-0.008	0.004	0.007	0.009	0.008	0.007	0.007	0.002

2015发生突变。*CWD*在1980—1985年、1993—2000年、2010—2015年发生突变。*R10*在1980—1985年、2010—2015年发生突变。*R20*在1980—1985年、2010—2015年发生突变。*R25*在1980—1985年、2010—2015年发生突变。

4　结　论

本文基于138个气象站点，选取1981—2016年的日降水量、日平均气温以及日最低（最高）气温等气象资料，分析了黄土高原地区27个极端气候指数的时空变化，得到以下结论：

（1）黄土高原地区*TX90P*、*TN90P*、*GSL*、*SU25*，*TR20*、*TXx*、*WSDI*等极端气温指数均呈显著上升趋势；而极端气温指数中的*FD0*、*ID0*、*TNx*和*CSDI*呈显著下降趋势；其余指数的变化均较为平缓。总的来看，黄土高原极端气温指数的冷指数在逐渐减少，暖指数在逐渐增加。

（2）极端降水指数变化趋势平缓，接近均值。发生变化的*SDII*和*R95p*均呈上升趋势，而*CDD*、*R99p*及*CWD*均呈下降趋势，但变化趋势总体上均不明显。

（3）黄土高原地区极端气温指数在空间上存在差异。除与全区变化一致的指数外，*TX10P*、*TN10P*、*TNx*、*TXn*、*DRT*均各子区间与全区变化趋势存在不同，主要在黄土塬区、黄土峁状丘陵区和石质山地区。

（4）总体上看，极端降水指数在空间分布上差异明显。除*R99p*、*R95p*和*SDII*在各子区域上与全区一致外，其余极端降水指数在各子区域上与全区变化趋势存在不同，主要表现在黄土塬和黄土梁状丘陵区。

（5）大多数极端气温指数的突变主要发生在两个时间段，分别为1980—1985年和2010—2015年。大多数极端降水指数的突变主要发生在1985—1990年和2010—2015年两个时间段。比较二者突变节点，极端气温指数比极端降水指数的突变发生的时间节点相对较早。

参考文献（References）

[1]　MEEHL G A, STOCKER T F, COLLINS W D, et al. Global climate projections climate change 2007[C]// The physical science basisof the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007: 710-719.

[2]　LIAO H, CHANG W. Integrated assessment of air quality and climate change for policy-making: Highlights of IPCC AR5 and research challenges[J]. National Science Review, 2014, 1(2): 176.

[3]　王晓利. 中国沿海极端气候变化及其对NDVI的影响特征研究[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2017. [WANG Xiaoli. Variation of extreme climate and its impact on NDVI in the coastal area of China[D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2017.]

[4]　BROWN S J, CEASER J, FERRO C A T. Global changes in extreme daily temperature since 1950[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008, 113(D5): D05115, doi:10.1029/2006JD008091, 2008.

[5]　KEGGENHOFF I, ELIZBARASHILI M, AMIRI-FARAHANI A, et al. Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971—2010[J]. Weather & Climate Extremes, 2014, 4: 75-85.

[6] 春兰, 秦福莹, 宝鲁, 等. 近55 a内蒙古极端降水指数时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 963-972. [CHUN Lan, QIN Fuying, BAO Lu, et al. Spatiotemporal variation of extreme precipitation indicesin Inner Mongolia in recent 55 years[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 963-972.]

[7] SKANSI M D LM, BRUNET M, SIGRTO J, et al. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America[J]. Global & Planetary Change, 2013, 100(1): 295-307.

[8] LIMAMI P D, SANTO F E, RAMOS A M, et al. Recent changes in daily precipitation and surface air temperature extremes in mainland Portugal, in the period 1941—2007[J]. Atmospheric Research, 2013, 127(6): 195-209.

[9] CHOI G Y, COLLINS D, REN G Y, et al. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific network region, 1955—2007[C]//International Training Workshop on Cas-twas-wmo Forum. 2009: 1906-1925.

[10] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 337-353. [REN Guoyu, FENG Guolin, YAN Zhongwei. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China[J]. Climatic Environment Research, 2010, 15(4): 337-353.]

[11] 翟盘茂, 任福民. 中国近四十年最高最低温度变化[J]. 气象学报, 1997, 55(4): 418-429. [ZHAI Panmao, REN Fumin. On changes of China's maximum and minimum temperatures in the recent 40 years[J]. Acta Meteor Sinica, 2997, 55(4): 418-429.]

[12] 周玉科. 1960—2012年青藏高原极端气候时空动态与变异研究[J]. 资源与生态学报, 10(4): 397-414. [ZHOU Yuke. Characterizing the spatio-temporal dynamics and variability in climate extremes over the Tibetan Plateau during 1960—2012[J]. Journal of Resources and Ecology, 10(4): 397-414.]

[13] 闫慧敏, 陈伟娜, 杨方兴, 等. 过去50年内蒙古极端气候事件时空格局特征[J]. 地理研究, 2014, 33(1): 13-22. [YAN Huimin, CHEN Weina, YANG Fangxing, et al. The spatial and temporal analysis of extreme climatic events in Inner Mongolia during the past 50 years[J]. Geographical Research, 2014, 33(1): 13-22.]

[14] 杨方兴. 内蒙古地区极端气候事件时空变化及其与NDVI的相关性[D]. 西安: 长安大学, 2012. [YANG Fangxing. Trends of extreme daily precipitation and temperature and the correlation with NDVI in Inner Mongolia[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.]

[15] 崔凤琪, 唐海萍, 张钦, 等. 1960—2017年呼伦贝尔草原极端气候事件时空变化[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1382-1391. [CUI Fengqi, TANG Haiping, ZHANG Qin, et al. Spatiotemporal variation of extreme climatic events in the Hulunbuir grasslands during the period of 1960—2017[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(6): 1382-1391.]

[16] 薛海丽, 张钦, 唐海萍. 近60 a内蒙古不同草原类型区极端气温和干旱事件特征分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 701-711. [XUE Haili, ZHANG Qin, TANG Haiping. Extreme temperature and drought events in four different grassland areas of Inner Mongolia in recent 60 years[J]. Arid Land Geography, 2020, 41(4): 701-711.]

[17] 黄浩, 张勃, 黄涛, 等. 近30a甘肃省河东地区极端气温指数时空变化特征及趋势预测[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 319-328. [HUANG Hao, ZHANG Bo, HUANG Tao, et al. Quantifying and predicting spatial and temporal variations in extreme temperatures since 1990 in Gansu Province, China [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 319-328.]

[18] 格根巴图, 魏巍, 张晓, 等. 柴达木盆地极端气候时空趋势及周期特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 304-313. [GEGEN Batu, WEI wei, ZHANG Xiao, et al. Spatiotemporal trends and periodic features of climate extremes over the Qaidam Basin, China, during 1960—2014[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 304-313.]

[19] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 1965—2013年黄土高原地区极端气温趋势变化及空间差异[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 639-652. [ZHAO Anzhou, LIU Xianfeng, ZHU Xiufang, et al. Trend variations and spatial difference of extreme air temperature events in the Loess Plateau from 1965 to 2013[J]. Geographical Research, 2016, 35(4): 639-652.]

[20] SUN W, MU X, SONG X, et al. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960—2013 under global warming[J]. Atmospheric Research, 2016, 168: 33-48.

[21] 杨勤科. 黄土高原地区地理分区图(2000年)[EB/OL]. 地球系统科学数据共享平台-黄土高原科学数据共享平台. 2013. [YANG Qinke. Graphs of geographical division on the Loess Plateau (2000) [EB/OL]. Data Sharing Infrastructure of Earth System Science-Data Sharing Infrastructure of Loess Plateau, 2013.]

[22] 宋超. 河北大海陀自然保护区山地草甸植被变化及影响因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016. [SONG Chao. Study on the vegetation change and its influencing factors of upland meadow in Dahaituo Nature Reserve[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.]

[23] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961—2005年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531. [HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al. Characteristics of temperature and precipitation in northeastern China from 1961 to 2005[J]. Acta Ecological Sinica, 2013, 33(2): 519-531.]

Temporal and spatial changes of extreme weather indices in the Loess Plateau

YANG Wei-tao[1,2,3], SUN Jian-guo[1,2,3], KANG Yong-tai[4], MA Heng-li[1,2,3], XU Rui-ze[1,2,3]

(1 *Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;* 2 *National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, Gansu, China;* 3 *Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, Gansu, China;* 4 *Lanzhou Institute of Surveying and mapping, Lanzhou 730070, Gansu, China*)

Abstract: Loess Plateau is the central region of Mainland China and its fragile ecological environment and frequent extreme climate greatly impact human production and life. Based on the 138 meteorological site observation data, using the method of monadic linear equation and Mann-Kendall for 27 of the Loess Plateau region's spatial and temporal variations of extreme climate index not only help promote the Loess Plateau area's ecological environment protection and soil and water conservation management, but also strongly provide a decision support for regional sustainable development in the Loess Plateau. By studying the trends of extreme climate index and mutation, the following conclusions are generated: (1) The Loess plateau of extreme temperature index of frost days (*FD*0), ice days (*ID*0), monthly maximum value of daily minimum temperature (*TNx*), and cold spell duration indicator (*CSDI*) are decreasing gradually; Growing season length (*GSL*), summer days (*SU*25), tropical nights (*TR*20), monthly maximum value of daily maximum temperature (*TXx*), and warm spell duration indicator (*WSDI*) are increasing continuously, while the rest of the index change vary more gently. In general, the cold index and the warm index of the Loess Plateau's extreme temperature index are decreasing gradually. (2) There are spatial differences in the extreme temperature indexes. In addition to the indexes consistent with the changes of the whole region, cool days (*TX*10*P*), cool nights (*TN*10*P*), monthly minimum value of daily maximum temp (*TXn*), monthly maximum value of daily maximum temp (*TXx*), and diurnal temperature range (*DTR*) are different in sub-regions and the whole region, which are mainly manifested in the Loess tableland, hilly Loess, and rocky mountain areas. (3) The variation trend of extreme precipitation index is flat and close to the multi-year average. Simple daily intensity index (*SDII*) and very wet days (*R*95*p*) showed an upward trend, while consecutive dry days (*CDD*), extremely wet days (*R*99*p*) and consecutive wet days (*CWD*) showed a downward trend. However, the change trend was not obvious on the whole. In terms of spatial distribution, except for wet days (*R*99*p*), very wet days (*R*95*p*), simple daily intensity index (*SDII*), strong precipitation, and annual average daily precipitation intensity are consistent with the variation trend of the whole region in each sub-region. Other indexes are different from the variation trend of the whole region in each sub-region and are mainly manifested in Loess tableland and girder hills. (4) Most of the abrupt transitions of extreme temperature indexes occurred in 1980—1985 and 2010—2015, while most of the abrupt changes in the extreme precipitation index occurred from 1985 to 1990 and from 2010 to 2015. Comparing the abrupt transition nodes of the two, the abrupt transition time node of the extreme temperature index is relatively earlier than that of the extreme precipitation index.

Keywords: Loess Plateau; extreme climate; spatial-temporal characteristics; mutations